



TITLE:

炭素繊維単繊維の力学的異方性評価方法に関する研究(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

藤田, 和宏

CITATION:

藤田, 和宏. 炭素繊維単繊維の力学的異方性評価方法に関する研究. 京都大学, 2020, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2020-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r13335>

RIGHT:

京都大学	博士（工学）	氏名	藤 田 和 宏
論文題目	炭素繊維単繊維の力学的異方性評価方法に関する研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、複合材料の強化繊維として重要な炭素繊維の力学特性について、一般的に行われている軸方向引張特性以外の方向の特性に注目し、評価に重要な繊維径の見かけ上の変化の原因を明らかにするとともに、単繊維で行う様々な力学特性評価試験法を、試験条件、評価方法の妥当性を含めて開発し、実際に試験を行って炭素繊維の異方性を明らかにすることを目標に研究した成果についてまとめたものであり、7章からなっている。</p> <p>第 1 章は緒論であり、研究背景および本論文の目的を述べている。まず、炭素繊維の開発の歴史と現状を概説し、日本の生産量が世界一であることを述べた。次に、炭素繊維の構造とそれに起因する異方性と JIS の整備状況、加えて JIS において規定されていない力学特性評価が重要であることについて述べた。また、軸方向引張試験以外の、これまでに行われてきた試験について説明し、炭素繊維の異方性を評価することの必要性について述べている。</p> <p>第 2 章では、力学特性の評価において不可欠である繊維の断面の寸法および形状を得ることを目的として、繊維径の計測を詳細に行った。計測のために、レーザー回折を原理とし、試験片を移動、回転することができる新たな装置を開発した。4 種類の市販の炭素繊維について横断面の方向を含めた繊維径の変化とその軸方向の位置による変化について計測した。その結果、1 本の繊維内で断面の寸法や形状は軸方向の位置によってほぼ変わらないが、その断面形状は少しずつ回転しているという結論を得た。この結果に基づき、断面を楕円と仮定して引張特性を評価したところ、円形断面と仮定するよりも評価値の変動係数が小さくなることが分かった。</p> <p>第 3 章では、繊維のせん断弾性率を求めることができる単繊維のねじり試験の開発を念頭に、各種試験条件がねじり弾性率に及ぼす影響について検討した。初期ひずみが 0.0004～0.004 程度では得られるねじり弾性率に影響しないこと、空気抵抗や内部摩擦の影響は 0.3%程度とわずかであることを明らかにし、推奨される試験条件を決定した。本試験は特別な装置も必要なく簡便な試験でありながら、再現性の高い試験である。しかし、その評価には繊維径が 4 乗で影響するため、繊維径の評価が重要である。第 2 章で求めた結果を用い、楕円断面を仮定することで、いびつな断面形状の繊維では円形断面として評価した時よりも変動係数が大幅に小さくなり、断面形状、寸法の評価の重要性を確認した。</p> <p>第 4 章では、繊維軸と直角方向の特性を得ることができる単繊維の軸直角方向圧壊試験を市販の装置を改造して行い、評価手法について検討するとともに、試験条件の影響について調べた。炭素繊維は軸方向への引っ張りでは破断までに 1～2%程度しかひ</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	藤田 和宏
<p>ずまないが、軸直角方向には繊維径の 3 分の 1 近くもひずむことが分かった。高弾性率ピッチ系繊維の圧壊強さは PAN 系繊維に比べ 10 分の 1 程度しかなく、破壊後の繊維の様子も全く異なっていた。そして、軸直角方向の特性には、黒鉛結晶の力学特性よりも空隙などそれ以外の部分の影響が大きいことが分かった。弾性率を求めるための理論式が比較的大きなひずみでも適用可能であることを有限要素解析により明らかにした。また、PAN 系の繊維で軸方向引張弾性率 E_L の軸直角方向弾性率 E_T に対する比が 11~16、E_L のせん断弾性率 G_{LT} に対する比が 14~15 であるのに対し、高弾性率のピッチ系繊維では E_L / E_T が 97、E_L / G_{LT} が 95 と非常に異方性が高く、材料設計においては配慮が十分必要なことが分かる。試験条件について検討したところ、負荷速度は圧壊強さにほとんど影響しなかったが、圧子寸法の影響があり、できるだけ大きな圧子の方が試験に適していることが分かった。</p> <p>第 5 章では、単繊維の三点曲げ試験を行うための装置を開発し、試験を行った。PAN 系の繊維ではスパンが短くなると曲げ強さは高くなり、寸法効果が一因と考えられた。一方ピッチ系繊維ではスパンによらずほぼ一定の曲げ強度を示し、圧縮側のナノバックリングが原因と考えられた。曲げ弾性率の挙動には、軸方向圧縮弾性率を含む異方性を考慮することが必要であることが、3 次元有限要素解析により明らかとなった。また、曲げ弾性率のスパンによる変化を、絶対値としてかなり再現できたことから、本論文で得られたせん断弾性率や軸直角方向弾性率が妥当であることを示すことができた。</p> <p>第 6 章においては、周辺繊維によるマトリックスの変化が懸念される場合の、界面せん断強度の評価手法の開発を行った。C/C 複合材料では周辺炭素繊維によってマトリックス組織が配向するため、これを考慮に入れた界面せん断強度を評価するマイクロコンポジット引き抜き試験を行った。マイクロコンポジットにより、マトリックス単体では再現できない界面近傍のマトリックス組織を再現することができた。引き抜き試験の結果、界面せん断強度の評価には、せん断応力の複合材料中での分布を考慮する必要があることが分かった。マトリックスが樹脂の状態から炭化すると界面せん断強度は低下したが、炭化ではある程度繊維表面官能基による化学結合が残存するものと考えられた。さらに 2000℃で黒鉛化すると界面せん断強度が向上した。これは炭素マトリックスの結晶化による収縮のためと考えられた。2600℃でさらに黒鉛化すると、結晶の発達によって界面が試験前にはがれてしまったと考えられる試験片が多数見られた。</p> <p>第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、複合材料の強化繊維として重要な炭素繊維の力学特性について、一般的に行われている軸方向引張特性以外の方向の特性に注目し、評価に重要な繊維径の見かけ上の変化の原因を明らかにするとともに、単繊維で行う様々な力学特性評価試験法を、試験条件、評価方法の妥当性を含めて開発し、実際に試験を行って炭素繊維の異方性を明らかにした成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- 1) レーザー回折を原理とし、試験片を移動、回転することで、繊維軸方向の繊維径の変化を計測できる新たな装置を開発した。本装置により、1本の繊維内で軸方向の位置によって横断面の寸法や形状はほぼ変わらないが、横断面の向きが少しずつ回転するように変化するために、見かけ上繊維径が軸方向に変化していることを明らかにした。
- 2) 繊維のせん断弾性率を求めるためのねじり振子試験について、初期ひずみなどの試験条件について検討するとともに、断面形状評価が及ぼす影響について考察した。初期ひずみや空気抵抗の影響は大きくないことを明らかにした。また、繊維径の評価が重要であり、いびつな断面形状の繊維では楕円断面を仮定することにより測定のばらつきが大きく改善することが分かった。
- 3) 市販の微小硬度計を改良することにより、単繊維の軸直角方向圧壊試験を行った。軸直角方向圧縮では繊維径の3分の1近くまで変形することが分かった。また、軸直角方向の特性には、黒鉛結晶の力学特性よりも空隙などそれ以外の部分の影響が大きいことが分かった。軸方向引張弾性率の軸直角方向弾性率に対する比は、高強度のPAN系繊維で11～16、高弾性率のピッチ系繊維で97と、非常に異方性が高いことが分かった。
- 4) 単繊維の三点曲げ試験を行うための装置を開発し、試験を行った。その結果、曲げ弾性率はせん断変形の影響がほぼないと考えられるスパンにおいても、引張弾性率よりもかなり低い値となった。これは、繊維軸方向の圧縮弾性率が主に影響していると考えられ、有限要素法による解析によりせん断弾性率や圧縮弾性率の影響が裏付けられた。
- 5) マイクロコンポジットによる界面せん断強度の評価手法を開発した。C/Cコンポジットでは周辺繊維の存在によりマトリックス組織が樹脂単体の炭化とは異なった組織となるが、マイクロコンポジットによって実際のC/Cコンポジットでの微視的な組織を再現した界面せん断強度の評価を行うことができた。

以上のように、本論文は、大きな異方性を有する炭素繊維の軸方向引張特性以外の様々な特性を評価するための試験法の開発、評価を行っており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年1月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。